

考虑消纳责任权重和共享储能介入的多微网 非对称纳什谈判

顾 杰¹,黄陈蓉²,张建德²,施炎峰²,裴星懿¹

(1. 南京工程学院 电力工程学院,南京 211100;2. 南京工程学院 计算机工程学院,南京 211100)

Multi-microgrid asymmetric Nash negotiation considering the inclusion of responsibility weights and shared energy storage

GU Jie¹, HUANG Chenrong², ZHANG Jiande², SHI Yanfeng², PEI Xingyi¹

(1. School of Electrical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211100, China;2. School of Computer Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211100, China)

摘要:在“双碳”政策的影响下,清洁能源成为了国家提倡使用的能源类型,在可再生能源不断发展并投入使用的同时,其浪费问题引起了广泛的关注,因此,储能技术应运而生。在共享储能和微网联盟之间,利益的分配问题是各方共同关注的,在考虑了国家推出的责任消纳的基础上,针对微网与储能电站的利益问题,提出了一种基于非对称的纳什谈判模型。将此非线性问题转化成微网联盟效益最大化和利益分配两个子问题依次求解,采用交替乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)对其进行分布式求解,并将提出的非对称纳什谈判与对称的纳什谈判进行比较。通过对合作谈判的前后对比分析,得出所提的考虑消纳责任权重和共享储能介入的非对称纳什谈判模型能在降低各主体的成本同时,还能促进可再生能源的消纳,有效解决能源浪费问题。

关键词:共享储能;消纳责任权重;非对称纳什谈判;交替乘子法

Abstract: Under the influence of the “dual carbon” policy, clean energy has become the type of energy advocated by the country. With the continuous development and application of renewable energy, the waste of renewable energy has attracted extensive attention, and energy storage technology has emerged. Between shared energy storage and micro-grid alliance, the distribution of benefits is of common concern to all parties. Therefore, an asymmetric Nash negotiation model for the benefits of micro-grid and energy storage power station based on the consideration of the responsibility absorption introduced by the state is proposed. Then, the nonlinear problem is transformed into two sub-problems of benefit maximization and benefit allocation of the micro-grid alliance. The alternating direction method of multipliers is used for distributed solution. The asymmetric Nash negotiation proposed is compared with the symmetric Nash negotiation. Through the comparative analysis of cooperative negotiation before and after, it is concluded that the proposed asymmetric Nash negotiation model considering the weight of absorption responsibility and the involvement of shared energy storage can not only reduce the cost of each subject, but also promote the absorption of renewable energy and effectively solve the problem of energy waste.

Key words: shared energy storage; weight of absorbing responsibility; asymmetric Nash negotiation; ADMM

0 引言

目前能源危机的问题引起全球广泛的关注,能源体系朝着清洁、安全的方向发展是未来的发展趋势^[1-2]。对可再生能源进行开发与利用也成为了实现低碳目标的必然选择,由此促进了风电、光伏等可再生能源的发展和应用。但是在可再生能源飞速发展的同时,可再生能源的浪费问题也日渐凸显。储能技术和共享经济在近些年的飞速发展使

得共享储能将成为未来用户侧储能的新形式。

国家能源局于2019年5月推出建立并实施可再生能源配额制(renewable portfolio standard, RPS)的相关政策。在此政策下,每个省级行政区域在积极完成区域内的消纳任务同时,还需研究如何利用市场手段来完成消纳任务以应对消纳任务未完成的情况^[3]。目前共享储能的概念也越来越受到推崇,将微网和共享储能相结合的新形式能够有效提高可再生能源的消纳率^[4]。

共享储能是多个参与主体的能源调度问题,也是主体与主体之间的能源交易问题。能源的交易问题一般涉及的金额较大,这就需要经济学中的博弈论方法参与其中。多主体之间的能源交易博弈论的方法

收稿日期:2023-03-11;修回日期:2023-05-13
基金项目:江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20210928);江苏省产学研合作项目(BY2020367)

可以分为非合作博弈和合作博弈两类^[5]。非合作博弈侧重于自身的利益,指在多主体在利益相互影响的过程中,通过自身的决策与运作是自己的利益最大化。文献[6]根据能源产销者的能源剩余和不足,将多个社区微网分为买方和卖方互相主从博弈。而本文研究的非对称纳什谈判则是在合作博弈的基础上,对其内部成员之间的利益分配的一种手段^[7]。在标准的议价博弈模型中,每个参与者存储与购买的电能是不相同的,对能源合作的贡献程度也是不一样的,所以让所有的参与者获得相同的利益显然是不公平的,因此本文介绍的非对称纳什谈判模型就是根据参与主体的贡献度来分配收益,使每个主体的收益是不相同的,从而解决微网用户的利益分配矛盾。

1 共享储能介入的多微网系统

1.1 储能电站服务模式

储能电站的经营机制是由运营商投资建设共享储能电站,共享储能电站可以为用户提供充放电的服务。储能电站内部设置操作中心,负责储能电站的运营与管理,并向用户收取相应的服务费。热电联供型微网用户有冷负荷、热负荷和电负荷3种类型负荷,主要设备包括燃气轮机、余热锅炉、吸收式制冷机等^[8]。储能电站的收益主要来源于微网存储与取回电能的价格差,若用户存在剩余的电能,用户可以通过支付服务费,使得共享储能电站以充电的形式吸收用户剩余的电能;或者用户直接放弃剩余电能^[9]。

1.2 系统模型

以微网的运行成本最小为目标,目标函数为

$$\min C = \sum_{t=1}^T (C_t^{\text{pri_e}} P_t^{\text{buy}} + C_{\text{abs}}^{\text{e,tran}} P_{\text{abs},t}^{\text{e,tran}} - C_{\text{relea}}^{\text{e,cut}} P_{\text{relea},t}^{\text{e,cut}} + C_{\text{DR}}^{\text{h}} P_{\text{DR},t}^{\text{h}}) + C_{\text{tgc}} Q_{\text{tgc}} + \sum_{t=1}^T C_{\text{Gas}} N_{\text{Gas},t} \quad (1)$$

式中: $C_t^{\text{pri_e}}$ 为 t 时刻购电的电价; $C_{\text{abs}}^{\text{e,tran}}$ 为微网可转移电负荷的电价; $C_{\text{relea}}^{\text{e,cut}}$ 为微网可削减电负荷的电价; C_{DR}^{h} 为微网可转移热负荷的电价; C_{tgc} 为考核期内购买的超额消纳量/绿证的电价; C_{Gas} 为天然气的价格; P_t^{buy} 、 $P_{\text{abs},t}^{\text{e,tran}}$ 、 $P_{\text{relea},t}^{\text{e,cut}}$ 、 $P_{\text{DR},t}^{\text{h}}$ 、 Q_{tgc} 、 $N_{\text{Gas},t}$ 分别为购电功率、可转移和可削减电负荷量、可转移热负荷量、考核期内购买的超额消纳量/绿证的电量、系统的总耗气量; T 为时段数。

(1) 燃气机组模型

燃气机组燃烧天然气来生产电能^[10],其发电量 P_{GT}^{e} 与天然气耗量的关系如下

$$P_{\text{GT}}^{\text{e}}(t) = P_{\text{gas}}(t) \eta_{\text{GT}} \quad (2)$$

$$P_{\text{GT}}^{\text{h}}(t) = F_{\text{GT}}(t) L_{\text{NG}} \eta_{\text{GT}} \quad (3)$$

式中: $P_{\text{GT}}^{\text{e}}(t)$ 为输出电功率; $P_{\text{gas}}(t)$ 为燃气功率; η_{GT}

为发电效率; $P_{\text{GT}}^{\text{h}}(t)$ 为产热功率; $F_{\text{GT}}(t)$ 为燃气量; L_{NG} 为燃气热值。

(2) 吸收式制冷机

吸收式制冷机将热能转换成冷能,则其输出功率为

$$P_{\text{GT}}^{\text{h}}(t) = P_{\text{GT}}(t) \gamma_{\text{GT}} \eta_{\text{WH}} \eta_{\text{cooling}} R_{\text{AC}} \quad (4)$$

式中: $P_{\text{GT}}^{\text{h}}(t)$ 为制冷功率; γ_{GT} 为热电比; η_{WH} 为锅炉的效率; η_{cooling} 制冷的比例; R_{AC} 为能效比。

(3) 电制冷机

电制冷机利用电能进行制冷,输出功率如下

$$Q_{\text{EC}}(t) = P_{\text{EC}}(t) R_{\text{EC}} \quad (5)$$

式中: $Q_{\text{EC}}(t)$ 为电制冷机的制冷功率; $P_{\text{EC}}(t)$ 为消耗的电功率。

(4) 余热锅炉

$$P_{\text{WH,out}} = P_{\text{WH,in}} \eta_{\text{WH}} \quad (6)$$

式中: $P_{\text{WH,out}}$ 为输出热功率; $P_{\text{WH,in}}$ 为输入功率。

(5) 风力发电机组

$$P_{\text{wt},t}^{\text{out}} = \begin{cases} P_r \frac{v_t - v_{\text{in}}}{v_r - v_{\text{in}}} & v_{\text{in}} \leq v_t \leq v_r \\ P_r & v_r \leq v_t \leq v_{\text{out}} \\ 0 & v_t \leq v_{\text{in}}, v_t \geq v_{\text{out}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $P_{\text{wt},t}^{\text{out}}$ 、 P_r 分别为风机的 t 时刻输出功率和额定功率; v_{in} 、 v_r 、 v_{out} 分别为切入、额定和切出风速。

(6) 储能系统

假设单位时段内储能系统的充放能功率恒定,储能系统的通用模型如下所示

$$E_{\text{ess}}(t) = E_{\text{ess}}(t-1) + \left[\eta^{\text{abs}} P_{\text{ess,abs}}(t) - \frac{1}{\eta^{\text{relea}}} P_{\text{ess,relea}}(t) \right] \Delta t \quad (8)$$

式中: $E_{\text{ess}}(t)$ 为存储的能量; η^{abs} 、 η^{relea} 分别为充放电效率; $P_{\text{ess,abs}}(t)$ 、 $P_{\text{ess,relea}}(t)$ 分别为充放电功率。

1.3 约束条件

1.3.1 微网部分

(1) 微网的平衡约束

$$L_e(t) = L_{e0}(t) + P_e^{\text{cut}}(t) + P_e^{\text{tran}}(t) \quad (9)$$

式中: $L_e(t)$ 、 $L_{e0}(t)$ 、 $P_e^{\text{cut}}(t)$ 、 $P_e^{\text{tran}}(t)$ 分别为实际、初始、可削减和可转移电负荷。

(2) 微网的热负荷功率约束

$$L_h(t) = L_{h0}(t) - P_h^{\text{DR}}(t) \quad (10)$$

式中: $L_h(t)$ 、 $L_{h0}(t)$ 、 $P_h^{\text{DR}}(t)$ 分别为实际、初始和可削减热负荷。

(3) 微网可削减电功率上下限约束

$$-\mu_e^{\text{cut}} L_{e0}(t) \leq P_e^{\text{cut}}(t) \leq 0 \quad (11)$$

式中: μ_e^{cut} 为可削减系数。

(4) 微网可转移电功率上下限约束

$$\begin{cases} -\mu_e^{\text{tran}} L_{e0}(t) \leq P_e^{\text{tran}}(t) \leq \mu_e^{\text{tran}} L_{e0}(t) \\ \sum P_e^{\text{tran}}(t) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: μ_e^{tran} 为可转移系数。

(5) 微网的可削减热功率上下限约束

$$0 \leq P_h^{\text{DR}}(t) \leq \mu_h^{\text{DR}} L_{h0}(t) \quad (13)$$

式中: μ_h^{DR} 为可削减系数。

1.3.2 热带联产机组以及设备运行约束

(1) 燃气轮机热电联产功率约束

$$Q_{\text{WHR},T} = \frac{P_{\text{GT},t}}{\eta_{\text{GT}}} (1 - \eta_{\text{CT}}) \eta_{\text{WHR}} \quad (14)$$

式中: $Q_{\text{WHR},T}$ 为热回收功率; η_{GT} 为供电效率; η_{WHR} 为热回收效率。

(2) 各部分上下限约束

$$P_{\text{GT}}^{\min} \leq P_{\text{GT}}^e(t) \leq P_{\text{GT}}^{\max} \quad (15)$$

$$P_{\text{GB}}^{\min} \leq P_{\text{GB}}^h(t) \leq P_{\text{GB}}^{\max} \quad (16)$$

$$0 \leq P_{\text{wd}}^e(t) \leq P_{\text{wd}}^{\text{predict}}(t) \quad (17)$$

$$P_{\text{AC}}^{\min} \leq P_{\text{AC}}^e \leq P_{\text{AC}}^{\max} \quad (18)$$

$$P_{\text{EC}}^{\min} \leq P_{\text{EC},t} \leq P_{\text{EC}}^{\max} \quad (19)$$

(3) 吸收式制冷机约束

$$P_{\text{AC},t} = Q_{\text{AC},t} \eta_{\text{AC}} \quad (20)$$

式中: $P_{\text{AC},t}$ 为输出冷功率; $Q_{\text{AC},t}$ 为输入热功率; η_{AC} 为制冷效率。

(4) 微网的热/电负荷平衡约束

$$\begin{cases} P_{\text{GT}}^e(t) + P_{\text{wd}}^e(t) + P_{\text{buy}}^e(t) = L_e(t) + P_{\text{EC}}^e(t) \\ P_{\text{GT}}^h(t) + P_{\text{GB}}^h(t) = L_h(t) + P_{\text{AC}}^h(t) \\ P_{\text{EC}}^e(t) + P_{\text{AC}}^e(t) = L_e(t) \end{cases} \quad (21)$$

(5) 微网单次购电量上限约束

$$0 \leq P_{\text{buy}}^e(t) \leq 500 \quad (22)$$

式中: 设定单次购电量上限为 500 kWh。

(6) 配额约束

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M P_{\text{wd}}^e(t) + Q^{\text{leg}} \geq \beta \sum_{t=1}^T L_e(t) \quad (23)$$

式中: β 为可再生能源消纳责任权重。

(7) 电量非负性约束

$$Q^{\text{leg}} \geq 0 \quad (24)$$

1.3.3 储能电站的相关约束

(1) 储能电站倍率约束

储能电站容量和额定功率之间成正比^[11]

$$E_{\text{ess}}^{\max} = \varepsilon P_{\text{ess}}^{\max} \quad (25)$$

式中: ε 为储能电站能量倍率。

(2) 储能电站荷电状态和充放电功率约束

$$\begin{cases} E_{\text{ess}}(0) = 20\% E_{\text{ess}}^{\max} \\ 10\% E_{\text{ess}}^{\max} \leq E_{\text{ess}}(t) \leq 90\% E_{\text{ess}}^{\max} \\ 0 \leq P_{\text{ess},\text{abs}}(t) \leq U_{\text{abs}}(t) P_{\text{ess}}^{\max} \\ 0 \leq P_{\text{ess},\text{relea}}(t) \leq U_{\text{relea}}(t) P_{\text{ess}}^{\max} \\ U_{\text{abs}}(t) + U_{\text{relea}}(t) \leq 1 \\ U_{\text{abs}}(t) \in \{0, 1\}, U_{\text{relea}}(t) \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (26)$$

式中: $U_{\text{abs}}(t)$ 、 $U_{\text{relea}}(t)$ 分别为充电和放电状态位, 在本文中将其设为 0-1 变量。

2 纳什谈判模型

本章首先建立基于纳什谈判的多微网合作博弈模型, 基于此模型再以非对称议价的方式分配收益。

2.1 纳什谈判的基本原理

一个标准的纳什谈判问题可表示为

$$\begin{cases} \max \prod_{n=1}^N (U_n - U_n^0) \\ \text{s.t. } U_n \geq U_n^0 \end{cases} \quad (27)$$

式中: U_n 为参与主体在谈判合作后的收益; U_n^0 为参与主体在谈判合作前的收益, 即谈判破裂点; N 为参与的主体数。

2.2 纳什谈判的破裂点计算

将纳什谈判理论应用于共享储能电站和各个微网用户主体之间的合作问题, 则可以得到以下的模型

$$\begin{cases} \max (U_{\text{PES}} - U_{\text{PES}}^0) \prod_{n=1}^N (U_n - U_n^0) \\ \text{s.t. } U_{\text{PES}} \geq U_{\text{PES}}^0 \\ U_n \geq U_n^0 \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{cases} \max U_{\text{PES}}^0 = C_{\text{sell}}^{\text{ess}} - C_{\text{buy}}^{\text{ess}} - C_{\text{inv},w} \\ \min U_n^0 = -(C_{\text{MG}}^{\text{buy}} - C_{\text{MG}}^{\text{sell}} + C_{\text{gas}}^{\text{gas}} + C_{\text{abs}}^{\text{e,tran}} P_{\text{abs},t}^{\text{e,tran}} + C_{\text{DR}}^{\text{h}} P_{\text{DR},t}^{\text{h}} + C_{\text{tgc}} Q_{\text{tgc}} - C_{\text{relea}}^{\text{e,cut}} P_{\text{relea},t}^{\text{e,cut}}) \end{cases} \quad (29)$$

式中: U_{PES}^0 、 U_n^0 分别为未参与合作谈判的共享储能电站和参与主体的最大收益。

将式(28)转换为两个子问题依次求解: 效益最大化子问题(以下简称 P1)和收益分配子问题(以下简称 P2), 依次求解。基于纳什谈判理论模型式(27)构建的多微网电能合作共享模型如下

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^N [C_i^{\text{MG}}(P_{i,t})] \\ \text{s.t. 式(1)-式(24)} \end{cases} \quad (30)$$

式中: C_i^{MG} 为微网 i 的总运行成本; $P_{i,t}$ 为微网 i 在 t 时刻交易的总电量。

3 多微网纳什谈判模型求解

本文采用交替方向乘子法, 并在 Matlab 2016 中调用商业求解器 Cplex 和优化求解器 Mosek 以及 Yalmip 工具箱对两个子问题进行分布式求解。

3.1 基于 ADMM 的 P1 的求解

对于储能电站来说, 满足 $P_{\text{E,n}}(t) + P_{\text{n,E}}(t) = 0$ 时,

共享储能电站与各个微网用户达成共识。为求解此问题,首先引入拉格朗日乘子 λ^l 、惩罚因子 ρ^l 和收敛精度 ψ 。

(1) 共享储能电站的分布式优化运行模型

$$\begin{aligned} \min & \left\{ C_{\text{inv},w} + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \lambda^l [P_{E,n}(t) + P_{i,E}(t)] + \right. \\ & \left. \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \frac{\rho^l}{2} \|P_{E,n}(t) + P_{i,E}(t)\|_2^2 \right\} \end{aligned} \quad (31)$$

式中: $C_{\text{inv},w}$ 为储能电站的日平均投资和维护成本。

(2) 微网*i*分布式优化运行模型

$$\begin{cases} \min & \left\{ C_i^{\text{MG}} + \sum_{t=1}^T \lambda^l [P_{E,i}(t) + P_{i,E}(t)] + \sum_{t=1}^T \frac{\rho^l}{2} \|P_{E,i}(t) + P_{i,E}(t)\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t.} & \text{式(9)-式(24)} \end{cases} \quad (32)$$

接着根据分布式迭代模型,建立系统收益最大化问题的分布式算法,迭代公式为

$$\lambda^{l+1} = \lambda^l + \rho^l [P_{E,i}^{k+1}(t) + P_{i,E}^{k+1}(t)] \quad (33)$$

$$\max \left\{ \sum_{t=1}^T [P_{E,i}^k(t) + P_{i,E}^k(t)] \right\} < \psi \quad (34)$$

通过式(33)进行迭代,当满足式(34)的收敛条件时迭代停止,完成系统收益最大化问题的求解。

3.2 基于ADMM的P2的求解

在非对称议价利益分配问题中,本文同样采用一种基于自然对数的非线性函数来量化不同微网在电能共享中的贡献大小,以此公平分配能源共享所带来的益处。

首先,计算微网用户*i*在参与能源合作时,存储的电能 E_i^{store} 和获得的电能 E_i^{receive}

$$\begin{aligned} E_i^{\text{store}} &= \sum_{t=1}^T \max(0, P_{i,j,t}) \\ E_i^{\text{receive}} &= -\sum_{t=1}^T \min(0, P_{i,j,t}) \end{aligned} \quad (35)$$

选用基于自然常数e为底数的指数函数量化微网用户的贡献

$$X_i = e^{E_i^{\text{store}}/E_{\text{max}}^{\text{store}}} - e^{E_i^{\text{receive}}/E_{\text{max}}^{\text{receive}}} \quad (36)$$

式中: $E_{\text{max}}^{\text{store}}$ 为存储电能的最大值; $E_{\text{max}}^{\text{receive}}$ 为购买电能的最大值。

将子问题P1中求得的交互电量最优解代入子问题P2中,基于纳什谈判模型式(25)构建的多微网非对称议价收益分配模型如下所示

$$\begin{cases} \max & \prod_{n=1}^N (C_n^0 - C_n^{\text{MG}} + C_n)^{X_n} \\ \text{s.t.} & \text{式(14)-式(24)} \\ & C_i^0 - C_i^{\text{MG}} + C_i > 0 \end{cases} \quad (37)$$

式中: C_i^0 为微网*i*参与电能合作前的电能成本; C_i

为电能共享成本。

为了实现更加简便的求解,将式(37)的问题进行转化如下

$$\min \prod_{n=1}^N -X_n \ln(C_n^0 - C_n^{\text{MG}} + C_n) \quad (38)$$

与对称议价的电能合作问题处理方法相同,将交易平衡多耦合约束解耦成双耦合约束,其表示形式如下

$$K_{i-j,t} - K_{j-i,t} = 0 \quad \forall i \quad (39)$$

式中: $K_{i-j,t}$ 为微网*i*对电量 $P_{i-j,t}$ 期望的交易电量单价; $K_{j-i,t}$ 为储能电站对子问题P1已求解出的最优交易电量 $P_{i,E}(t)$ 期望的交易单价,当 $K_{i-j,t} = K_{j-i,t}$ 时,表明微网*i*与储能电站达成了交易价格共识,并用ADMM算法分布式求解:

(1) 首先要计算各个微网用户参与电能交易合作后的议价能力 X_i 。

(2) 建立式(38)的拉格朗日增广函数

$$\begin{aligned} L_i = & -X_i \ln(C_i^0 - C_i^{\text{MG}} + C_i) + \\ & \sum_{t=1}^T \omega^l (K_{i-j,t} - K_{j-i,t}) + \frac{\varepsilon^l}{2} \sum_{t=1}^T \|K_{i-j,t} - K_{j-i,t}\|_2^2 \end{aligned} \quad (40)$$

式中: ω^l 为拉格朗日乘子; ε^l 为惩罚参数。

(3) 微网*i*再迭代更新与储能电站之间的交易价格,则

$$\begin{aligned} K_{i-j,t}(k+1) &= \arg \min L_i [\omega^l(k), K_{i-j,t}(k+1), K_{j-i,t}(k)] \\ K_{j-i,t}(k+1) &= \arg \min L_i [\omega^l(k), K_{i-j,t}(k), K_{j-i,t}(k+1)] \end{aligned} \quad (41)$$

(4) 拉格朗日乘子的更新

$$\omega^l(k+1) = \omega^l(k) + \varepsilon^l (K_{i-j,t} - K_{j-i,t}) \quad (42)$$

(5) 更新迭代次数 $k=k+1$ 。

(6) 判断算法的收敛。

$$\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \|K_{i-j,t}(k+1) - K_{i-j,t}(k)\|_2 < \psi' , \text{则输出第 } k \text{ 次}$$

迭代收敛;反之,函数不收敛,迭代继续。

4 算例分析

4.1 算例系统

本文选取样例为3个微网系统:MG1、MG2、MG3和一个共享储能电站,各微网只和储能电站相连接。设置共享储能电站的最大荷电状态和最小荷电状态分别为0.9和0.1;微网的最大可削减电功率取总的电负荷量的0.15;可转移的电功率也控制在总的电负荷量的0.15以内。本文的非水可再生消纳责任权重设定为0.3,考虑风电绿证的购售,绿证价格定为0.4元/kWh,本文是选取某天的24时刻为例,得出的计算结果。

4.2 仿真结果分析

4.2.1 各微网和共享储能电站的成本分析

图1是MG1、MG2和MG3的出力和负荷曲线。在没有储能电站介入的情况下,当可再生能源出力大于同时段的微网总负荷时,微网则不需向外电网购电,并且多余的部分将会被抛弃;若可再生能源出力小于同时段的微网总负荷,那么则需向外电网购买电量,对不足的部分进行补充。

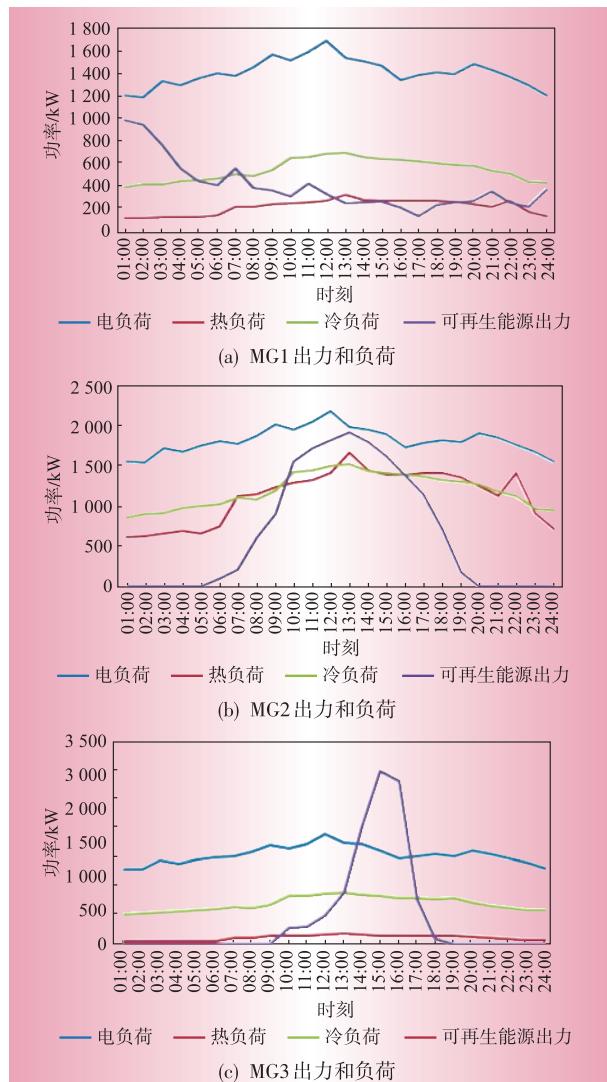


Fig. 1 Output and load of MG1, MG2 and MG3

图2为每个微网和储能电站经过迭代后的成本数据。经计算,无共享储能电站介入时,MG1、MG2、MG3的成本分别为5 952.7元、6 561.2元、12 014.0元。当有储能电站介入时,储能电站能将上述每时刻可再生能源多余的出力进行存储,也可在可再生能源出力不足的情况下,从储能电站购买由各个存储的电能。在有共享储能电站的微网联盟中,MG1、MG2、MG3的成本分别为5 740.2元、8 691.6元、5 936.5元,共享储能电站的成本为218.2元。

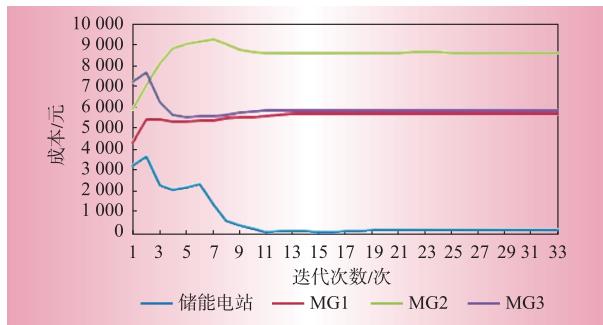


Fig. 2 Cost after intervention of shared energy storage

图3为微网联盟与储能电站的电能交易图,由于本文选取的是某一典型日24时刻的各微网负荷与出力情况,MG2和MG3在00:00、06:00没有可再生能源的出力,同时在此时段内MG2的负荷较大,储量不足以供给使用,所以MG2需要从外电网购电。但从MG1和MG3的成本有了大幅度的减小可以看出,共享储能电站的介入能有效地解决大量“弃风弃光”的现象。

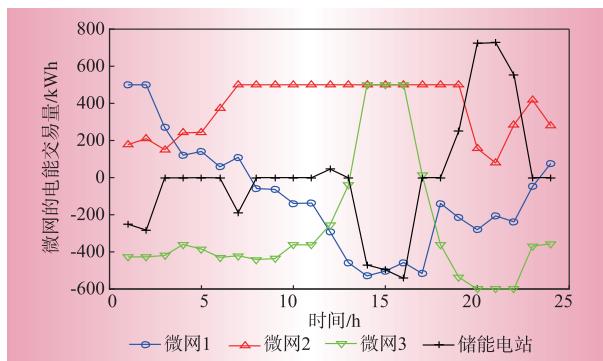


Fig. 3 Interaction electricity between microgrid and energy storage power station

本文在提出共享储能电站介入微网的同时增设了责任消纳权重,可进一步提高微网优先使用可再生能源的积极性,对可再生能源进行很好的消纳。

4.2.2 各主体的对称纳什谈判收益分析

在本文选取的24时刻内,储能电站的收益为220.262 8元,微网联盟的总体收益为220.263 1元。MG1、MG2、MG3这3个微网在有储能电站介入的微网系统中进行成本核算时会发现,MG2的成本高于没有储能电站时的成本,而MG1和MG3的成本则有明显降低。由此可发现,由于每个微网的负荷与出力情况不同,若是平均分配其所得收益,将会导致某些对能源合作贡献较大的微网成本比之前的成本高,这将会引发尖锐的矛盾。

4.2.3 各主体的非对称纳什谈判收益分析

根据MG1、MG2、MG3与储能电站的电能交易量

折线图可知,本文选取的3个微网中,MG2对能源合作的贡献度最大,所以经计算后确定MG1、MG2、MG3的议价因子分别是0.622 5、1.718 3、0.813 1。利用上文中不对称的纳什谈判模型,对每个微网与储能电站的交互电量的成本与收益进行核算,结果如表1所示。

表1 成本数据

Table 1 Cost data

参与主体 类型	MG1/元	MG2/元	MG3/元	储能电 站(收 益)/元	可再生 能源消 纳量/kWh
无储能电站 (无消纳 任务)	8 235.7	6 137.4	11 539.2	7 270.1	
无储能电站 (有消纳 任务)	5 952.7	6 561.2	12 014.0	10 905.2	
对称纳什 谈判 (有储能)	5 813.6	8 765.1	6 009.9	220.3	18 175.3
非称纳什 谈判 (有储能)	6 964.9	6 460.2	7 161.7	220.3	18 175.3

最新得出的成本结果是参与主体都能接受的,因为各方都在自己原有的成本基础上有了一定的减少,使参与能源合作的主体都能享受到相应的利益。由上述每个微网的成本对比可知,不对称的纳什谈判相对于对称的纳什谈判更加适用于微网联盟间的利益分配问题。

5 结束语

本文是在消纳责任权重和共享储能介入的基础上,对微网联盟内部的利益分配问题转化为效益最大化和利益分配两个子问题分别进行求解。通过分析,得出以下结论:

- (1) 共享储能的介入能有效改善可再生能源的浪费,降低微网用户的成本。责任消纳权重的约束条件能够进一步保证微网完成消纳任务。
- (2) 利用交替方向乘子法求解具有较好的收敛性,收敛速度快、精度高,同时保护了微网用户的隐私。
- (3) 在利益分配问题上,根据贡献度来分配的非对称纳什谈判比对称的纳什谈判更适用于此类问题。非对称的纳什谈判兼顾了整体利益和个人利益,避免微网用户之间的矛盾,提高参与能源合作的积极性。 ■

参考文献:

- [1] 谭显东,刘俊,徐志成,等.“双碳”目标下“电力供需形势[J].中国电力,2021,54(5):1-6.
TAN Xiandong, LIU Jun, XU Zhicheng, et al. Power sup-

ply and demand balance during the 14th Five-Year Plan Period under the goal of peaking carbon dioxide emissions and achieving carbon neutrality [J]. Electric Power, 2021, 54(5):1-6.

- [2] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等.区域综合能源系统若干问题研究[J].电力系统自动化,2015,39(7):198-207.
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiadong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39 (7) : 198-207.
- [3] 黄其励.中国可再生能源发展对建设全球能源互联网的启示[J].全球能源互联网,2018,1(1):1-9.
HUANG Qili. Insights from China renewable energy development or global energy interconnection [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(1):1-9.
- [4] ZHONG K, XIE S, XIE K, et al. Cooperative P2P energy trading in active distribution networks: an MILP-based nash bargaining solution [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2):1 264-1 276.
- [5] CUI S, WANG Y, SHI Y, et al. Community energy cooperation with the presence of cheating behaviors [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1):561-573.
- [6] LIU N, YU X, WANG C, et al. Energy-sharing model with price-based demand response for microgrids of peer-to-peer prosumers [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5):3 569-3 583.
- [7] CHIS A, KOIVUNEN V. Coalitional game-based cost optimization of energy portfolio in smart grid communities[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2):1 960-1 970.
- [8] 徐青山,李琳,蔡霖霖,等.考虑电能交互的冷热电多微网系统日前优化经济调度[J].电力系统自动化,2018,42(21):36-44.
XU Qingshan, LI Lin, CAI Jilin, et al. Day-ahead optimized economic dispatch of CCHP multi-microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42 (21) : 36-44.
- [9] 吴盛军,刘建坤,周前,等.考虑储能电站服务的冷热电多微网系统优化经济调度[J].电力系统自动化,2019,43(10):10-18.
WU Shengjun, LIU Jiankun, ZHOU Qian, et al. Optimal economic scheduling for combined cooling heating and power multi-microgrids considering energy storage station service [J]. Automation of Electric Power systems, 2019, 43(10):10-18.
- [10] 武昭原,周明,王剑晓,等.基于组合拍卖的城市能源系统共享储能运行方法[J].电力系统自动化,2022,46(17):83-90.
WU Zhao yuan, ZHOU Ming, WANG Jianxiao, et al. Operation method of shared energy storage for urban power energy based on combinatorial auction [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46 (17) : 83-90.
- [11] 刘若河,贾燕冰,谢栋,等.考虑配电网消纳能力的分布式电源与储能优化配置[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(1):166-172.
LIU Ruohé, JIA Yanbing, XIE Dong, et al. Optimal configuration of distributed generation and energy storage considering the consumption capacity in distribution network [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(1):166-172.

作者简介:

顾杰(1999),男,江苏盐城人,硕士,研究方向为综合能源与电力市场。

(责任编辑 张文翰)